

Photogrammétrie architecturale et modélisation 3D du patrimoine

■ Pierre GRUSSENMEYER

Avec le développement récent des appareils photographiques numériques et des logiciels de photo-modélisation, le marché de la photogrammétrie architecturale est désormais accessible à l'ensemble des bureaux d'études impliqués dans le relevé, la documentation et la modélisation 3D de l'espace bâti. De nombreuses techniques (mono-image, stéréoscopie, ou multi-image) peuvent être appliquées pour le relevé d'un objet à l'aide d'appareils photos numériques. Cet article présente quelques principes plus largement exposés dans Grussenmeyer et al. (2001). Le lecteur trouvera également des informations utiles sur le site Internet du CIPA (Comité International de Photogrammétrie Architecturale) [<http://cipa.icomos.org>] où de nombreux liens vers des sites professionnels sont répertoriés.

L orqu'on évoque la photogrammétrie, on pense principalement aux applications cartographiques issues de photos aériennes nécessitant une exploitation stéréoscopique. Ces applications, bien que de plus en plus accessibles techniquement et financièrement, restent réservées à des entreprises spécialisées. En s'intéressant à la photogrammétrie rapprochée et plus particulièrement à la photogrammétrie architecturale (dont on ne connaît en général que les restitutions de façades ou de cathédrales), on constate qu'il existe de nombreux logiciels capables de produire des restitutions 3D ou des modèles texturés à partir d'un ensemble d'images numériques d'un objet. L'objectif de cet article est de sensibiliser le lecteur à ces techniques en définissant quelques méthodes de relevé et de modélisation susceptibles d'intéresser les cabinets de géomètres et les bureaux d'études. L'article présente l'exemple du relevé d'un bâtiment, une sélection d'appareils photographiques numériques récents, des solutions pour le traitement des images et différents exemples d'applications pour illustrer ces solutions.

Relevé d'un bâtiment en photogrammétrie architecturale

Les photographies donnent une représentation complète de l'objet à un instant précis sur des supports (films, plaques de verre, ou fichiers-images) dont la conservation est en principe illimitée. Mais une photographie conique n'est qu'une projection d'un objet à trois dimensions. L'utilisation d'au moins deux photographies réalisées à partir de points de vue différents permet dans le cas général de reconstituer l'objet en 3D. L'information obtenue (points, lignes, surfaces, volumes) qui en résulte est traitée en vue de la représentation de l'objet par l'élaboration de modèles tridimensionnels ou de photomodèles.

Pour la réalisation des prises de vues terrestres, plusieurs chambres de prises de vues ayant des caractéristiques complémentaires (focales, format, etc.) sont en général néces-

saires pour tenir compte des obstacles, de la hauteur des bâtiments, du manque de recul. Il est souvent impossible de photographier dans des conditions proches du "cas normal". On peut alors réaliser des visées inclinées, des couples en biais ou des vues convergentes mais l'exploitation des photos sera plus difficile. Il est conseillé de relever l'ensemble d'un bâtiment en rajoutant des vues en biais pour créer un bloc plus stable (fig. 1).

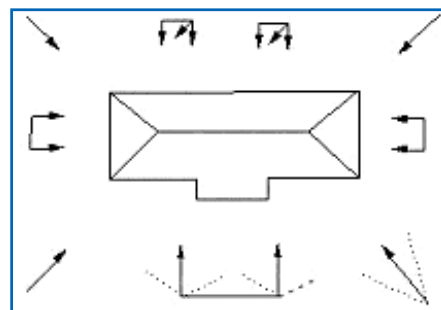


Fig. 1 : Disposition recommandée des clichés autour d'un bâtiment

Appareils photographiques

Les principaux critères pour l'utilisation d'appareils photographiques sont le format des clichés, le type d'objectif et leur qualité. En photogrammétrie aérienne, les formats des originaux sont de 23 cm x 23 cm. En photogrammétrie terrestre ou architecturale, les formats sont en général plus réduits pour des questions de mise en œuvre sur le terrain. Si l'utilisation de chambres métriques (réputées pour leur stabilité et la définition précise des paramètres internes) reste d'actualité, on peut cependant envisager de travailler avec des appareils photos au format 24 mm x 36 mm ou des appareils photos numériques non métriques lorsque la précision n'est pas l'objectif majeur. L'utilisation d'appareils photos numériques facilite le relevé et les images sont immédiatement utilisables pour la modélisation. Avec une bonne disposition des prises de vues autour d'un bâtiment (fig. 1), une chambre d'amateur étalonnée peut fournir des précisions de l'ordre du centimètre.

Constructeur	Type	Nbre de pixels (HxV)	Format d'image [mm²]	Prix
Appareils photos numériques avec zoom :				
Fuji	FinePix S602 Zoom	2048 x 1536	Super-CCD 1/1,7"	Env. 800 €
Minolta	Dimâge 7i	2560 x 1920	CCD 2/3"	Env. 1 000 €
Nikon	Coolpix 5700	2560 x 1920	CCD 2/3"	Env. 1 250 €
				
Reflex numériques à objectif interchangeable (prix boîtier nu) :				
Nikon	D100	3008 x 2000	CCD 23.7x15.6	Env. 2 600 €
Fuji	FinePix S2 Pro	4 256 x 2 848	Super-CCD 23x15.5	Env. 2 500 €
Canon	EOS D60	3 072 x 2 048	Cmos 22.7 x 15.1	Env. 2 900 €
Sigma	SD9	2 263 x 1 512	X3 Cmos 20.7x13.8	Env. 2 000 €
				
Reflex numérique métrique :				
Rollei	D507 (bi-focal)	2 552 x 1 920	CCD 2/3	Env. 5 000 €
				

Fig. 2. Exemples d'appareils photos numériques

Pour être utilisés en photogrammétrie, les objectifs doivent être étalonnés. L'étalonnage consiste à déterminer :

- la distance principale (ou focale) de l'objectif ;
- les coordonnées du point principal (centre de l'objectif projeté sur le fond de chambre) ;
- les paramètres de distorsion qui correspondent aux erreurs de représentation introduites par l'imperfection de l'objectif.

Les distorsions sont de l'ordre de 1 à 5 microns pour des objectifs métriques mais peuvent dépasser 100 microns sur les bords des images pour des appareils d'amateur. Certains logiciels proposent des solutions simplifiées pour l'étalonnage des appareils photos (fig. 3). Par exemple, le module "Camera Calibrator" du logiciel PhotoModeler [www.photomodeler.com] consiste à calculer les caractéristiques de l'appareil

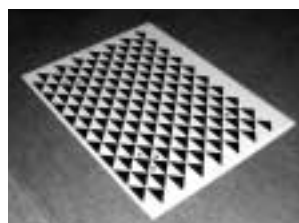


Fig. 3 : Mire d'étalonnage du logiciel PhotoModeler.

les caractéristiques de l'appareil

photo à partir d'un bloc de photos d'une mire plane (fixée sur un mur ou posée sur une surface plane). Cette solution (expéditive) permet d'étalonner un appareil en moins d'une heure. Des méthodes plus élaborées basées sur le relevé de canevas de points de référence en 3D seront utilisés pour un étalonnage plus rigoureux.

Les appareils suivants ne sont pas utilisables en photogrammétrie architecturale :

- les appareils auto-focus car la distance focale change pour chaque cliché, d'où une instabilité des paramètres ;
- les appareils à développement instantané en raison de l'absence de négatifs originaux ;
- les appareils jetables pour la très faible qualité de l'objectif.

Si l'objectif est équipé d'un zoom, celui-ci doit rester dans une position fixe durant toutes les opérations de relevé.

L'utilisation combinée de plusieurs appareils à film et d'appareils numériques au sein d'un même projet est courante en photogrammétrie architecturale.

Solutions pour le traitement des images

La photogrammétrie architecturale et la photogrammétrie aérienne n'ont ni les mêmes applications, ni les mêmes exigences. La plupart des Stations de travail Photogrammétriques Numériques sont principalement consacrées à la mesure d'images stéréoscopiques, l'aérotriangulation, les Modèles numériques de Terrain (MNT) et la production d'ortho-images à partir d'images stéréo aériennes et verticales. Malheureusement, de nombreux systèmes de photogrammétrie aérienne (plus spécialement développés pour la cartographie numérique) ne prennent pas en compte les contraintes de la photogrammétrie terrestre.

Il existe aujourd'hui de nombreux logiciels multi-images à faible coût, fonctionnant sur des ordinateurs PC standards, et capables d'utiliser différents types d'images (de chambres à matrices DTC ou des images scannées de petit et moyen format) au sein d'un même projet. Bien entendu, la qualité des images numériques influence directement le résultat définitif de la restitution. Des chambres numériques à basse résolution ou des scanners bon marché peuvent être suffisants pour des photomodèles 3D mais pas pour une documentation métrique. Au delà de la "traditionnelle" restitution 3D vectorielle de l'objet, de nombreux systèmes permettent de concevoir des photomodèles visuels ou virtuels en appliquant des textures réelles ou artificielles sur les modèles surfaciques tridimensionnels.

Les différents types de systèmes sont basés sur l'exploitation d'une ou plusieurs photos :

A partir d'une seule photo : lorsqu'on dispose d'images isolées d'un objet, quelques mesures de distances suffisent pour appliquer la technique de redressement sur les différentes parties planes de l'objet (façades par ex.). Le calcul de mosaïques d'images redressées est une application courante de la photogrammétrie architecturale. En disposant d'informations additionnelles sur la géométrie d'un objet, des techniques de modélisation mono-image ou de monorestitution peuvent être développées à partir d'une seule photo.

A partir de deux photos : si la géométrie de l'objet est complètement inconnue, la restitution d'une image seule d'un objet 3D est impossible. Deux images sont alors nécessaires. L'observation stéréoscopique des clichés est possible si les plans des photographies sont parallèles (fig. 4). Les prises de vues sont alors exécutées dans des conditions

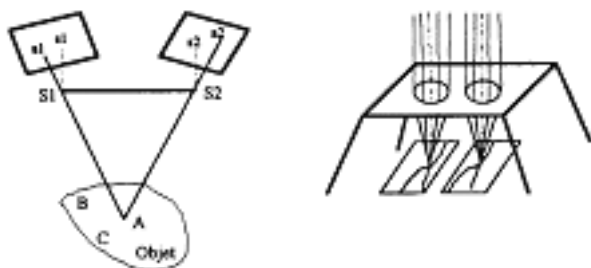


Fig. 4 : Photographies d'un objet à partir de deux points de vue différents.

proches du "cas normal", c'est-à-dire que les axes de prise de vues sont parallèles entre eux et perpendiculaires à la base photographique. La stéréorestitution permet de réaliser des plans 2D de façades, des modèles filaires et surfaciques en 3D, éventuellement complétés par leur topologie. La stéréorestitution est une méthode privilégiée pour l'analyse et l'interprétation des objets complexes. Les techniques de corrélation d'images ont permis d'automatiser quelques étapes du processus d'orientation des images et de faire évoluer les méthodes de restitution.

Bloc multi-image : pour reconstruire un objet complexe, la configuration de la prise de vue n'est pas forcément fondée sur des couples stéréoscopiques et des prises de vues parallèles. Les photos convergentes, horizontales, verticales ou obliques sont envisageables. Les traitements reposent sur l'ajustement de blocs d'images par la méthode des faisceaux, et permettent d'obtenir une solution robuste et homogène de la géométrie de l'objet. Les logiciels multi-images sont souvent utilisés pour la visualisation des objets en 3D, le calcul d'animations et de photomodèles (modèle en 3D avec textures, voir § 5.5.).



Fig. 5. Exemple de configuration multi-image

Exemples d'applications

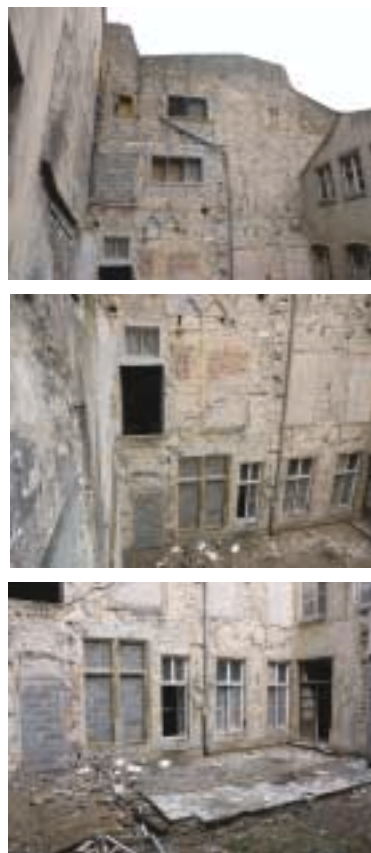
■ Redressement d'images numériques

En architecture, beaucoup d'objets peuvent être considérés comme plans. Dans ce cas une perspective unique est suffisante pour calculer une image redressée mise à l'échelle, même si la photo est inclinée par rapport au plan considéré. Au moins 4 points de contrôle définis par leurs coordonnées ou par des distances dans le plan de l'objet sont nécessaires pour calculer les paramètres du redressement par rapport aux plans de référence définis par l'utilisateur. De simples dessins 2D (en mode vecteur), des plans image (en mode raster) sont issus du redressement.

Les photographies des façades devraient être effectuées perpendiculairement aux plans de référence (sans trop d'inclinaison), et seule la partie centrale de l'image devrait être considérée pour une meilleure exactitude.

Les logiciels de DAO incluent souvent des outils de manipulation d'image et permettent une transformation simple de l'image ainsi que son redressement. Mais ils considèrent rarement les distorsions de la chambre, par opposition aux logiciels de photogrammétrie.

Figures 6 a, b et c : exemple de St Livier (Metz). Photos et relevé topographique de Louis Prieur, Architecte du Patrimoine à Thomery (77)



(a) Photos initiales obliques



(b) relevé topographique de la façade. Les points et les distances de contrôle sont utilisés pour le redressement des photos



(c) Photos redressées (mosaïque et détails de la façade)

Comme complément à la rectification d'images numériques et à la confection d'ortho-images, on peut transformer des images isolées correspondant à des surfaces d'expression analytique 3D connues pour fournir des produits raster, basés sur des projections cartographiques. Des projections de données raster et des développements non-métriques d'images de peintures sur voûtes cylindriques et sur surfaces sphériques sont possibles.

■ Modélisation mono-image

Pour définir la géométrie 3D d'une scène à partir d'une seule image, on peut appliquer différentes méthodes basées sur la reconstruction de la forme à partir de l'ombre, de combinaisons de focalisation et défocalisation, d'interprétation des textures ou encore de la géométrie. Ces méthodes sont bien connues en vision par ordinateur.

D'autres exemples de techniques de modélisation mono-image sont basées sur :

- l'utilisation des surfaces analytiques (évoquées dans le § 5.1.) ;
- la combinaison d'une image aérienne avec un MNT et des orthophotos pour l'automatisation du calcul de l'orientation externe ;
- l'utilisation de contraintes géométriques et topologiques ;

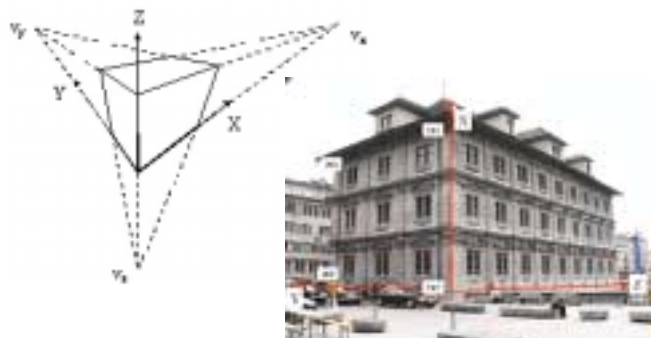


Fig. 7 : Application des concepts de la géométrie projective à la reconstruction 3D d'un bâtiment

- l'utilisation des concepts de la géométrie projective (coordonnées homogènes, points de fuite, homographie et coniques absolues). Ces approches sont intéressantes car elles donnent la possibilité d'effectuer une reconstruction 3D à partir d'une image non étalonnée.

L'exemple suivant illustre une reconstruction d'un bâtiment à l'aide de ses points de fuite et d'une homographie (Al Khalil & Grussenmeyer, 2002). Ces points sont calculés à l'aide de l'intersection des lignes parallèles aux axes de référence définis arbitrairement sur l'objet (figure 7). La reconstruction du modèle 3D sera par exemple basée sur les relations topologiques enregistrées dans une base de données relationnelles.

Exemple de stéréorestitution de 1992, et résultat de la restauration en 1998.

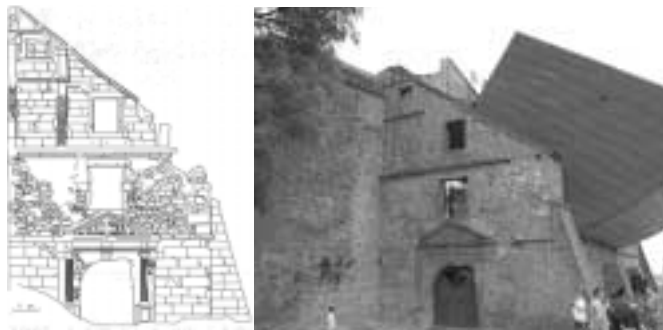


Fig. 8 : Château du Lichtenberg (Vosges du Nord).

■ Exemple de stéréorestitution

La stéréorestitution (basée sur l'observation de couples de prises de vues) est encore couramment mise en œuvre sur les stéréorestituteurs analytiques, notamment pour des objets riches en détail où le support argentique procure une précision élevée et un confort visuel. De plus en plus de systèmes de stéréorestitution numérique sont proposés actuellement, mais certains ne fonctionnent pas dans les conditions terrestres. Les applications de la stéréorestitution en photogrammétrie architecturale sont bien souvent des plans de façades (fig. 8), des relevés "pierre à pierre", de sculptures, de voûtes, de plafonds ou de vestiges archéologiques.

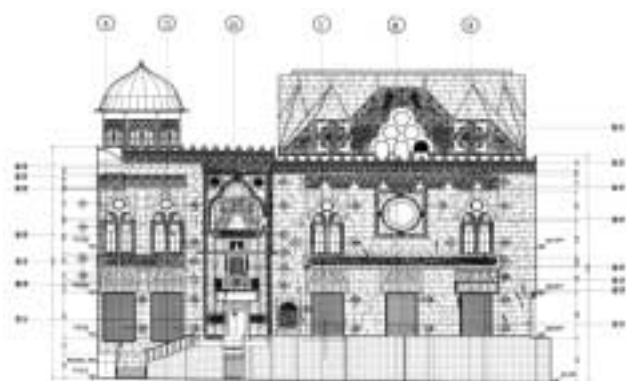


Fig. 9. Exemple de documentation d'une façade du complexe El Ghuri (Le Caire, Egypte) - Stéréorestitution de S. Guillemin (INSA Strasbourg), en relation avec le Centre d'Ingénierie et d'Archéologie de l'Université du Caire.

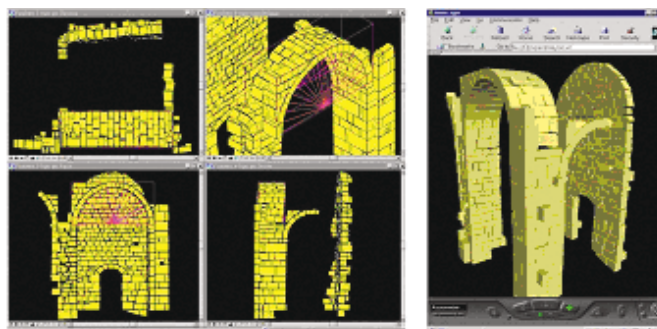


Fig. 10 : Exemple de photo métrique (chambre Wild P32) de la priorale Notre-Dame d'Aleyrac et résultats graphiques du relevé pierre-à-pierre

Dans l'exemple ci-dessous, le relevé avait pour mission primordiale la constitution d'archives, le constat des irrégularités, des dysfonctionnements de la structure et la description de l'appareillage des pierres.

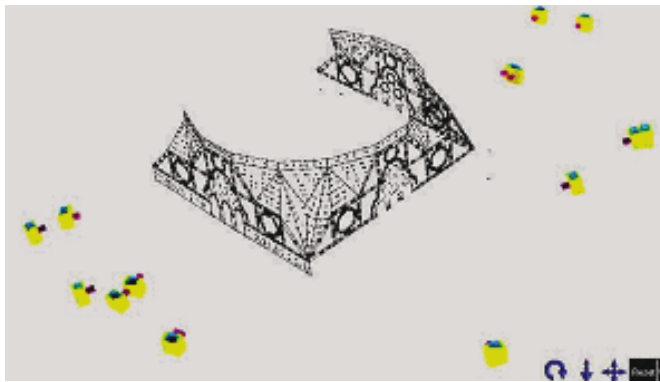
■ Photogrammétrie et mesure d'entités architecturales

Cet exemple présente une approche du relevé architectural, où la phase de mesure, guidée par un modèle architectural, est laissée à l'initiative de l'architecte ou de l'archéologue. Une partie de la Priorale Notre-Dame d'Aleyrac (édifice roman du XII^e siècle) a été choisie pour valider une approche du relevé "pierre-à-pierre" (Drap et al., 2000).

Le procédé de restitution des blocs (fig. 10) permet de définir, pour chacun des blocs, un mode d'extrusion et une profondeur approximative renseignée par l'utilisateur. La génération du modèle du bloc s'appuie donc sur la mesure de la face visible des blocs, sur la géométrie mesurée de l'entité architecturale propriétaire du bloc (un plan dans le cas de mur, cylindre pour l'intrados de l'arc du transept nord) et sur la profondeur estimée du bloc.

Après la mesure des faces visibles d'un bloc, sa morphologie est représentée par un polyèdre et stockée dans une structure de données qui permet de rendre compte de considérations topologiques et géométriques d'un ensemble de blocs.

Cette approche est proposée dans le module de saisie du logiciel de photogrammétrie ARPENTEUR (ARchitectural PhotogrammEtry Network Tool for Education and Research), développé au sein de l'UMR MAP 694 [www.arpenteur.net].



Géométrie du relevé photogrammétrique (objet par rapport aux stations de prise de vues)



Photomodèle 3D

Fig. 11 : Modélisation du dôme du mausolée El Ghuri au Caire (Egypte), à l'aide du logiciel PhotoModeler

■ Photogrammétrie multi-image et photomodèles

Les possibilités de visualisation en photogrammétrie architecturale sont liées à l'évolution des moyens informatiques. Les applications en temps réel et en 3D telles que des animations, des survols et visites interactives sont aujourd'hui possibles sur des ordinateurs individuels. On peut considérer deux concepts différents : celui de la "réalité virtuelle" qui utilise principalement des modèles en mode vecteur pour décrire une situation ou fiction non-existante (c.-à-d. virtuelle) ou celui de la "réalité visuelle" qui résulte d'une combinaison complexe de vecteurs, de surfaces et de textures provenant de photos pour visualiser un objet existant (photomodèle).

En fonction du but et de l'exactitude recherchée, il y a de nombreuses façons de créer de tels modèles 3D texturés. Elles vont du simple placage de photos redressées sur des surfaces géométriquement simplifiées de façades jusqu'à une re-projection des photos originales sur la géométrie complexe d'un bâtiment en utilisant les paramètres de l'orientation interne et externe de la chambre.

Si on considère que de tels modèles en 3D constituent la base de la documentation, on peut en déduire de nombreux produits dérivés comme par exemple des vues en perspective à partir d'un point de vue quelconque. Le format VRML est souvent utilisé pour décrire des modèles à trois dimensions et des scènes, y compris des éléments multimédia sta-

tiques et dynamiques. Les modèles 3D de l'objet peuvent être interactivement observés et visités par l'utilisateur. Un grand nombre de photos sera utilisé pour couvrir un objet dans son ensemble. Pour obtenir une solution homogène pour un objet, l'orientation simultanée de tous les clichés est nécessaire.

L'exemple suivant (Fig. 12) présente les résultats de la modélisation de l'ancien hôtel de Ville de Zurich (Suisse) datant de 1698 et relevé en mai 1999 avec des appareils photographiques numériques standards (images d'environ 1,3 Mpixels) dans le cadre d'un projet du CIPA [<http://cipa.icomos.org>].



Fig. 12a. Photos numériques utilisées pour le traitement multi-image du bâtiment

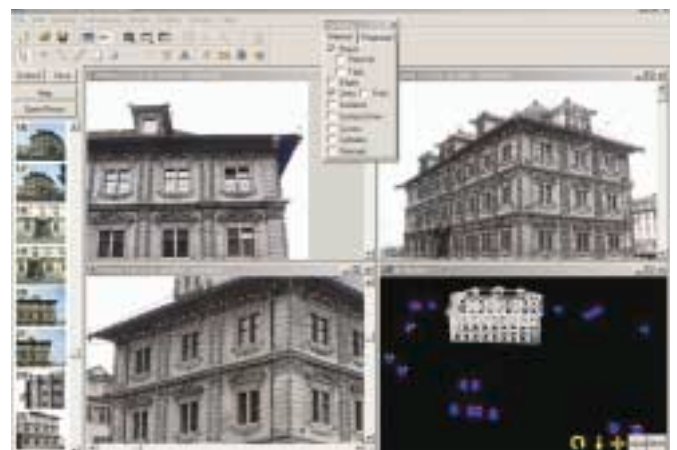


Fig. 12b. Restitution multi-image à l'aide du logiciel PhotoModeler

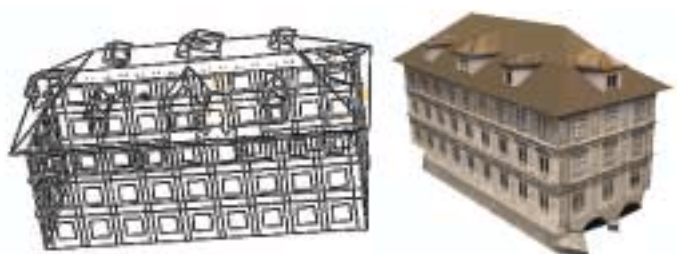


Fig. 12c. Résultat de la restitution 3D (modèle filaire)

Fig. 12d. Photomodèle 3D d'après (Rottensteiner et al., 2001)

Conclusion

Les différents exemples présentés ont permis de donner un aperçu de l'état actuel des techniques et des recherches en photogrammétrie architecturale. Le paragraphe consacré au relevé d'un bâtiment permettra au lecteur d'organiser sa prochaine campagne de prise de vues. L'apparition récente d'appareils reflex numériques à quelques milliers d'euros va sans aucun doute permettre d'augmenter la qualité géométrique et radiométrique des modèles issus des traitements. Les techniques pour le traitement des images restent manuelles et interactives. Les recherches actuelles vont dans le sens de l'automatisation des mesures et du développement de modules "métiers" dédiés à la représentation de catégories d'objets dans de nombreux domaines comme l'architecture, l'archéologie, l'épigraphie, et aussi pour le génie civil et l'industrie. De nombreux projets combinent les techniques de photogrammétrie et de lasergrammétrie, ce qui constitue sans aucun doute l'avenir dans le domaine de la modélisation 3D du patrimoine, mais le prix des scanners lasers est à l'heure actuelle dix à vingt fois supérieur à celui d'un appareil reflex numérique et d'un logiciel de photomodélisation.

Le Comité International de Photogrammétrie Architecturale (CIPA) a été évoqué à plusieurs reprises dans cet article. Le CIPA a été fondé en 1969 à l'initiative de M. Maurice Carbonnell (Ingénieur de l'Institut Géographique National, premier président du CIPA de 1969 à 1988, et actuellement Président d'Honneur), par le Conseil International des Monuments et Sites [www.icomos.org] et la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection [www.isprs.org]. Les objectifs du CIPA (désigné actuellement Comité ICOMOS & ISPRS pour la Documentation du Patrimoine Culturel) sont la promotion des applications de la photogrammétrie aux monuments et aux sites et le développement des techniques, la documentation et la conservation du patrimoine. J'assume actuellement au sein du CIPA les fonctions de délégué national, de trésorier et de membre du comité directeur. ●

Contact

Pierre GRUSSENMEYER

Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg
Equipe PAGE : Photogrammétrie Architecturale et GEomatique
UMR MAP n° 694 CNRS - Ministère de la Culture et de la Communication
Pierre.Grussenmeyer@insa-strasbourg.fr



<http://cipa.icomos.org>

Références

- Al Khalil, O., Grussenmeyer, P., 2002.** *Etude sur la reconstruction géométrique et topologique d'un bâtiment en photogrammétrie mono-image.* Revue de l'Association Française de Topographie, 2^e trim. 2002 N°91, p. 18-23.
- Drap, P., Gaillard, G., Grussenmeyer, P., Hartmann-Virnich, A., 2000.** *A stone-by-stone photogrammetric survey using architectural knowledge formalised on the ARPEUR Photogrammetric workstation.* XIXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Amsterdam 16-23 July 2000. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, part 5, pp. 187-194.
- El-Hakim, S., Beraldin, J.-A., Picard, M., 2003.** *3d modelling of heritage monuments, increasing realism by combining techniques.* GIM International (Geomatics Info Magazine), avril 2003, pp. 13-15.
- Grussenmeyer, P., Guillemin, S., 2000.** *Patrimoine et photogrammétrie architecturale, 1992-1999 : 8 ans de projets à l'ENSAIS.* Revue d'information des anciens élèves de l'ENSAIS, Arts et Industries n° 248, pp. 19-26. ISSN 0004-3982, janvier 2000.
- Grussenmeyer, P., Hanke, K., Sreilein, A., 2001.** *Photogrammétrie architecturale, chapitre dans "Photogrammétrie numérique",* édité par M. Kasser et Y. Egels, Editions Lavoisier-Hermès, pages 317-352.
- Kraus, K., Waldaeus, P., Traduction de Grussenmeyer P. et Reis O., 1998.** *Manuel de photogrammétrie, principes et procédés fondamentaux.* Paris : Hermès, 407 pages.
- Rottensteiner, F., Grussenmeyer, P., Geneva, M., 2001.** *Experiences with the digital photogrammetric program package ORPHEUS based on CIPA's "Zurich city hall" dataset for architectural photogrammetry.* In XVIII CIPA International Symposium, Potsdam, Germany, Sept. 18-21 st, 2001 & Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, Part 5/C7, pp. 639-646.

ABSTRACT

Due to recent developments in digital imaging and photomodeling software packages, architectural photogrammetry is nowadays available for every engineering office involved in the surveying, the documentation and 3D modeling of developed sites. Many techniques (mono-image, stereoscopy, or multi-image) can be applied for surveying objects with digital cameras. This paper presents some principles more largely presented in Grussenmeyer et al. (2001). The reader will also find information on the Internet site of the CIPA (International Committee of Architectural Photogrammetry) [<http://cipa.icomos.org>] where many links towards professional sites are indexed.